

環境の湿度変化がスポーツウエア着用時における 運動時の体温調節反応に及ぼす影響

神戸大学 井上 真理
(共同研究者) 同 柳 本周 治
同 桑 原 智 子
同 山 田 由佳子
同 近 藤 徳 彦

The Effects of Ambient Humidity on Thermoregulatory Responses during Exercise in Man Clothed a Sport Wear

by

Mari Inoue, Norihiko Kondo
*The Faculty of Human Development,
Kobe University*

Shuji Yanagimoto, Tomoko Kuwahara, Yukako Yamada
*Graduate School of Cultural Studies and Human Science,
Kobe University*

ABSTRACT

To investigate the effect of ambient humidity on thermoregulatory responses during exercise in men who clothed different types of sports wear, six healthy male performed a cycle exercise at almost 130 beats/min of heart rate (HR) for 50 min. We selected two environmental conditions of low humidity (LH, RH of 30%) and high humidity (HH, RH of 70%) at Ta of 26 °C with different T-shirts of two fiber types (cotton 100%: 100C, cotton 65% and polyester 35%: 65C35P). All subjects wore a running pant and T-shirt throughout

each experiment. Although there were no significant differences in cardiovascular parameters between LH and HH conditions, skin temperature inside cloth tended to be higher with high humidity. There was also no marked difference in those parameters between two fiber types. Mean skin temperature (Tsk) and average skin temperatures of clothed sites (IC-Tsl from abdomen, chest, back and upper arm) in HH are significantly higher than those in LH ($p<0.05$). Also, sweating rate (SR) and skin blood flow (SkBF) on the clothed sites (back) and total body weight loss tended to be greater with a rise in humidity. The SR and SkBF at which RH inside cloth reached at 70% in HH100C were significantly lower than those in LH100C ($p<0.05$). Moreover, the time at which RH inside cloth reached at 70% was significantly different between the two fiber types with the same environmental condition ($p<0.05$). The difference in cloth types did not influence Tsk and IC-Tsl during exercise in LH while those parameters in HH was significantly higher in 100C than 65C35P ($p<0.05$). The SR, SkBF and time at which RH inside cloth reached at 70% were significantly lower only in 100C than 65C35P ($p<0.05$). These results suggest that high humidity induces markedly increase in Tsk and IC-Tsl relative to low humidity in both the fiber types of 100% cotton and 35% polyester with 65% cotton, and that the later fiber type diminishes thermoregulatory responses (skin temperatures) and changes in environmental conditions inside cloth in high ambient humidity but not in low one.

要 旨

環境の湿度変化がスポーツウェア着用時における運動時の体温調節反応に及ぼす影響を検討するため、6名の健康な男子が心拍数約130拍/分の自転車運動を50分間実施した。環境条件は低湿度(LH, 環境温26℃, 相対湿度30%)と高湿度(HH, 環境温26℃, 相対湿度70%)とし、衣服の種類は綿100%(100C)布と綿65%ポリエステル35%(65C35P)混紡布のTシャツ2種類とした。全ての被験者は各実験においてランニング用パンツとTシャツのみを着用した。循環調節パラメータにおいてはLHとHHで有意な差はなかったが、衣服内の皮膚温がHHではLHより高い傾向にあった。また、これらのパラメータは異なる繊維素材間でも顕著な差は認められなかった。HHでの平均皮膚温(Tsk)と衣服内平均皮膚温(IC-Tsl,

腹, 胸, 背および上腕)はLHより有意に高かった($p<0.05$)。さらに、衣服内の背部での発汗量(SR)と皮膚血流量(SkBF)および全身体重減少量は湿度の上昇とともに多くなる傾向にあった。衣服内湿度が70%に達するときのSRおよびSkBFはHH100CでLH100Cより有意に低かった($p<0.05$)。衣服内湿度が70%に達するときの時間も有意に短かった($p<0.05$)。LHでの運動におけるTskおよびIC-Tslは衣服の種類に影響されなかったが、HHでは100Cのこれらの値は65C35Pより有意に高かった($p<0.05$)。衣服内湿度が70%に達するときのSR, SkBFおよび時間はHHにおいてのみ100Cで65C35Pより有意に低かった($p<0.05$)。これらのことから、綿100%布と綿65%ポリエステル35%混紡布のいずれも高湿度では低湿度より皮膚温が顕著に増加し、また、後者の布は高湿度での体温調節反応(皮膚温)と衣

服内環境の変化を抑制したが、低湿ではその抑制は認められなかった。

1. 緒言

運動中に着用するウェアの役割は、外部環境の変化から身体を保護し、また、内部環境（身体内部で発生する熱など）の変化に対して身体内部の環境をある範囲に保ち、運動を快適に行うことにあると考えられる。このような観点から、運動中のウェアは改良を重ねられ、毎年、夏や冬になると新しい素材のウェアが登場しているのが現状である。これまでウェアが運動中の生体反応に及ぼす影響を検討した研究は体温調節反応をもとにしたものが多く、その中でも、衣服の着用や被服面積の影響^{1, 3, 5, 6, 15)}や衣服の素材の違いの影響^{2, 5, 11, 12, 19)}を検討した研究が見られる。また、素材の違いに関しては、暑熱条件下では吸湿性の低い素材の衣服内湿度が高くなり、発汗開始時間が早く、また、発汗速度が速くなって深部体温が高くなるなどの研究結果が出されている²⁰⁾。

衣服着用時でも快適に運動を行うためには、前述したように衣服内環境をできる限りある範囲内に保つ必要があると考えられ、これには、1) 皮膚表面の皮膚血流量や発汗量などの体温調節反応、2) 衣服の通気性・吸湿性・放湿性、3) 外部環境条件（温度、湿度および気流）、の要因が関係している¹⁰⁾。これまでの研究では、外部環境として温度と湿度条件を一定にして、運動時の衣服内環境や体温調節反応がどのように変化するかを検討している場合が多い。しかし、衣服内環境は衣服内の発汗量と外部環境の湿度にも大きく影響されると考えられ、実際に衣服着用時における運動中の衣服内湿度は高湿度ほど高いことが報告されている³⁾。また、衣服の素材の違いにより2)の条件が異なることが報告されており^{4, 10)}、このことから、外部湿度が大きく異なる場合では、衣

服素材の違いが運動時の衣服内環境や体温調節反応の変化にも関係すると考えられる。しかし、これまでの研究で外部湿度の違いが衣服着用時の運動時の体温調節反応に及ぼす影響を詳細に検討したものは見当たらない。

そこで、本研究では運動時における衣服内環境や体温調節反応は外部湿度に影響を受け、その影響程度は衣服の素材によって異なるという仮説を立てた。この仮説を検証するために、異なる2種類の湿度環境下において、素材の違う衣服を着用したときの運動時の体温調節反応を検討した。

2. 方法

2.1 被験者

年齢 28.7 ± 8.2 才、身長 178.3 ± 3.8 cmおよび体重 67.8 ± 4.5 kgの健康な男子6名を被験者とした。実験に参加するに当たり、事前に実験の目的、方法、測定項目などの説明を行い、参加の同意を書面にて得た。

2.2 環境条件、衣服条件および実験手順

環境温は 26°C とし、相対湿度を30% (LH) と70% (HH) の2条件に変化させた。また、衣服の素材は綿100%布と、綿65%ポリエステル35%混紡布の2種類とした。衣服に関しては、市販されているものは同じサイズでも繊維の種類によって縫製やかたちが異なっているため、この違いが実験結果に影響することが考えられる。そこで、本研究ではいずれの布も同じかたちで同じ平編の半袖を特注した。それぞれの布の特性は表1に示す通りである。試料の厚さは、 $0.5\text{gf}/\text{cm}^2$ における厚さを示す。熱・水分移動特性として、サーモラボIIを用い、熱伝導特性としての熱コンダクタンス K ⁷⁾、接触冷温感 $q_{\text{max}}^{21)}$ 、乾燥条件での熱損失 Q_d 、発汗皮膚を模擬して水分の移動を伴った熱損失 Q_w を測定した⁷⁾。熱伝導特性としての熱コンダクタンス K は 20°C のWater Box と 30°C の熱

板の間に試料を置いたとき、熱板の温度を一定に保つために必要な熱流量である。接触冷温感 q_{max} は試料に温度差 10°C の熱板を接触させたときの熱流速最大値である。さらに保温性を求めるため、丸型風洞に整流 0.1m/sec の空気を試料上面に垂直にあて、試料上面の空気条件をできるだけ一定に保った状態で、人体皮膚を模擬した温度 30°C の熱板から試料を通して室温 20°C への熱損失のうち、乾燥条件での熱損失 Q_d 、濡れたろ紙を用いた湿潤条件での熱損失 Q_w を測定した。こうして得られた熱損失より、次式によって水分移動速度 m を求めた⁷⁾。

$$m = (Q_w - Q_d) / b \quad \dots (1)$$

ここで、 b は蒸発潜熱 (30°C のとき 2422J/g) である。通気抵抗 AR は通気度試験機 (KESF-8AP)⁸⁾ により測定した。吸水率 WA は (2) 式より求めた。

$$WA = (W' - W) / W \times 100 \quad \dots (2)$$

ここで、 W は 20°C $65\%RH$ における試料布の重さ、 W' は最大量吸水した試料布の重さである。

表1 試料の特性

特性	単位	100C	65C35P
繊維組成		綿 100%	綿 65% ポリエステル 35%
編密度	段数	wale/cm	24.5
	ループ数	course/cm	18.2
構造	厚さ	mm	0.980
	重量	mg/cm ²	14.59
熱伝導特性	K	W/m ² ·K	90.2
接触冷温感	q_{max}	W/m ²	0.119
熱損失(乾燥条件)	Q_d	W/m ² ·K	8.2
	(湿潤条件) Q_w	W/m ² ·K	24.2
水分移動速度	m	g/m ² ·sec	0.00661
通気抵抗	AR	kPa·sec/m	0.249
吸水率	WA	%	383
			279

各環境条件で、異なる2種類の衣服を着用し、心拍数 (HR) が約 130 拍/分になる運動負荷の自転車運動を実施した。すなわち、 $30\%RH$ の環境下で綿 65% ポリエステル 35% の半袖着用条件 (LH65C35P)、 $30\%RH$ の環境下で綿 100% の半袖着用条件 (LH100C)、 $70\%RH$ の環境下で綿 65%

ポリエステル 35% の半袖着用条件 (HH65C35P)、および $70\%RH$ の環境下で綿 100% の半袖着用条件 (HH100C) の4条件とした。

被験者は前述した各条件に設定された環境制御室 (精度: 室温 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, 相対湿度 $\pm 3\%$, 室内気流 $0.1 \sim 0.3\text{m/sec}$, SR3000, ナガノ科学社製) で約 50 分間安静を保持した。その間に測定機器や電極などの装着を行った。その後、ベースラインのデータを3分間測定し、続いて自転車運動を50分間実施し、終了後は10分間の回復期間を設けた。また、生体パラメータへの日内変動の影響を避けるため、各実験 (4回) は別の日の同一時間帯に実施した。

2. 3 測定項目

HR, 自覚的運動強度 (RPE), 平均血圧 (MAP), 深部体温 (食道温; T_{es} , 舌下温; T_{or}), 皮膚温 (T_{sl} ; 胸, 背, 腹, 上腕, 前腕, 大腿および下腿), 胸, 背および前腕の発汗量 (SR) と皮膚血流量 ($SkBF$), 背部での衣服内温度および湿度, 衣服表面温度 (胸と背), 不快感 (4スケール; 1快適, 2やや不快, 3不快, 4非常に不快), 温冷感 (6スケール; 1非常に暑い, 2暑い, 3暖かい, 4やや暖かい, 5どちらともいえない, 6やや涼しい, 7涼しい, 8寒い, 9非常に寒い) および湿感 (4スケール; 1大変湿っている, 2湿っている, 3少し湿っている, 4乾燥している) を測定した。

HR は CM5 による胸部誘導で、心拍テレメトリー (DS-3130, Fukuda 電子社製) により計測した。RPE は Borg のチャートを利用し、血圧は Riva-Rocci 型を用い測定し、MAP は (収縮期血圧 - 拡張期血圧) / 3 + 拡張期血圧の式で算出した。 T_{es} , T_{or} , T_{sl} および衣服表面の温度の測定には熱電対を用い、 T_{es} は鼻腔より身長 $1/4$ センサーを挿入した (今回の実験では1名の被験者で挿入が困難であった)。また、Ramanathan¹⁷⁾ の式により平均皮膚温を、これらの体温パラメータから平均

体温 (T_b ; $T_{es} \times 0.9 + T_{sk} \times 0.1$) を算出した。

SR の測定には換気カプセル法を用いた。1.54cm²の円形のカプセルを測定部位に装着し、それに600mlの乾燥窒素ガスを流し、カプセルを通過した窒素の温度と湿度を温湿度センサー (HMP133Y, Vaisala社製) で計測し、SRを計算した。SkBFの測定にはレーザードップラー法による血流測定装置 (ALF21, アドバンス社製) を用いた。皮膚血流量測定用プローブの位置は発汗測定用カプセルから1.5cm以内とした。衣服内温度と湿度はSR測定で用いたものと同じセンサーにより測定した。

体温, SR およびSkBFのデータは1秒毎にデータロガー (HR2300, 横河電機社製) を介して、パーソナルコンピュータ (PC9801RA, NEC社製) に取り込んだ。また、HRのデータは200Hzのサンプルで別のデータロガー (MP100, Biopac社製) を介して記録した。RPE, 不快感, 温冷感および湿感は10分毎に被験者に申告してもらい、また、血圧は15分毎に測定した。実験前後の体重測定より総体重減少量を、衣服重量の測定より衣服に付着した汗の量を算出した。

2.4 データの分析および統計処理

HR, 体温パラメータ, SR およびSkBFのデータは5分毎の平均値を算出した。衣服内湿度が70%以上になった場合にある被験者ではその値の急激な上昇が見られたので、この値が70%になるときの時間、体温, SR およびSkBFを算出した。また、各条件での発汗開始閾値および皮膚血管拡張閾値を時間で算出した。

統計解析として、時系列の条件間の差の検定には繰り返しのある2元配置分散分析を、閾値などのデータの検定には1元配置の分散分析を用いた。いずれも有意水準は0.05%以下とした。

3. 結果

3.1 安静時のパラメータ

安静時のHR, MAP, Tor, Tes および衣服内湿度には条件間で有意な差が認められなかった。衣服内湿度はLH65C35Pが $27.7 \pm 1.6\%$, LH100Cが $30.6 \pm 2.7\%$, HH65C35Pが $52.1 \pm 5.9\%$ およびHH100Cが $54.8 \pm 1.4\%$ となり、HHがLHより有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。また、LHの場合には衣服内湿度は環境湿度に近い値であったが、HHの場合には衣服内湿度は環境湿度より低かった。不快感は湿度が高いほど大きく、温冷感は湿度が高いほど低い値を示した。

3.2 運動時のパラメータ

循環・体温パラメータ

有意な変化は認められなかったが、HRは湿度が高いほど上昇し、逆にMAPは低くなる傾向にあった。一方、RPEには湿度変化に伴う一定の傾向は認められなかった (図1)。

Tesの上昇においてはHH100Cが低い傾向にあったが、有意な差ではなかった。T_bにおいても条件間で顕著な差は認められなかった。一方、T_{sk}はLHの方が運動中の上昇が有意に小さく、また、HH100Cの場合がHH65C35Pより有意に高かった ($p < 0.05$) (図1)。さらに、各部位のT_{sl}においてもT_{sk}とほぼ同様の傾向が認められた (図2)。腹部T_{sl}はいずれの湿度条件においても衣服の種類間で、背部と上腕部T_{sl}はHH100CとHH65C35Pの間に有意な差があった ($p < 0.05$) (図2)。また、衣服内平均皮膚温 (IC-T_{sl}) はHH100CがHH65C35Pより有意に高かった ($p < 0.05$) (図2)。

衣服環境・感覚パラメータ

衣服内温度は運動開始後少し上昇し、15分目を境に低下し、その低下は湿度が低いほど大きい傾向にあった (図3)。衣服表面の温度は

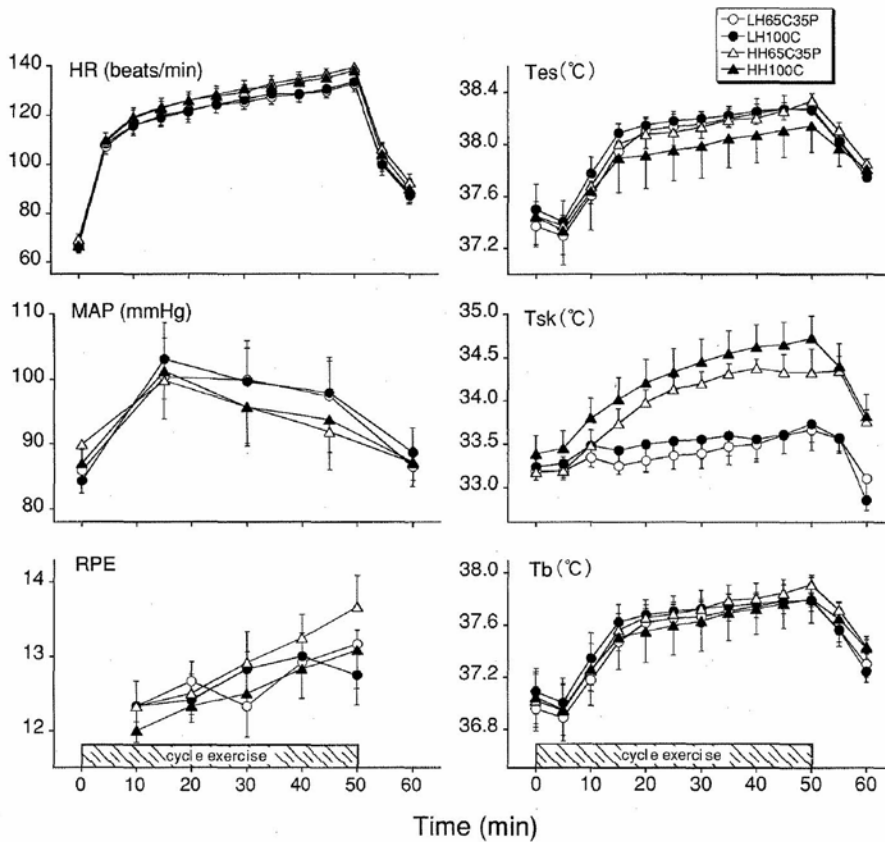


図1 実験中の心拍数 (HR), 平均血圧 (MAP), 自覚的運動強度 (RPE), 食道温 (Tes), 平均皮膚温 (Tsk) および平均体温 (Tb) の経時変化. 各パラメータの経時変化に関する条件間での有意差については結果を参照.

LH100Cを除いて同じような変化を示した. 衣服内湿度の運動開始前の値は湿度が高いほど有意に高かったが, 運動継続とともに湿度間の差は小さくなり, 運動開始後30分目以降は4条件で同様の変化を示した. また, 回復10分間では低下を示さなかった (図3). 不快感には条件による差は認められなかったが, 湿感HHほど低い傾向にあった. 温冷感は運動前半にLHほど高い傾向にあり, 運動後半は4条件で差がなく, 回復期において運動前半と同じような条件間の差が認められた (図3).

運動終了後の衣服の重さは, LH65C35Pが $45.83 \pm 12.47\text{g}$, LH100Cが $66.17 \pm 15.89\text{g}$, HH65C35Pが $94.17 \pm 17.17\text{g}$ および HH100Cが $122.83 \pm 24.37\text{g}$ であり, 同じ衣服の種類ではHHで有意に, また, 同じ湿度では100Cの方が35P65Cより有意に大きかった ($p < 0.05$).

熱放散パラメータと衣服内環境

いずれの部位のSRも4条件で有意な差は認められなかったが, HHほど発汗量が多く, 胸部と背部ではHH65C35Pが最も多い傾向にあった. SkBFの変化と湿度の違いとの間に一定傾向は認められず, HH100Cが最も低い部位 (胸部と前腕部) も見られた (図4). 衣服の種類間ではHH65C35Pの胸部SkBFはHH100Cのそれよりも有意に高い値を示した. 衣服で覆われている部位の発汗開始閾値時間および皮膚血管拡張閾値時間には4条件で有意な差は認められなかった. 総体重減少量はLH65C35Pが $578.00 \pm 33.97\text{g}$, LH100Cが $691.33 \pm 67.46\text{g}$, HH65C35Pが $736.17 \pm 66.49\text{g}$, およびHH100Cが $734.83 \pm 58.57\text{g}$ となり, HHほどその値は大きく, 同じ衣服条件で湿度間に有意な差が認められた ($p < 0.05$).

SRやSkBFの増加とともにこれらの値がある範囲までは衣服内温度は大きく変化しないが, ある

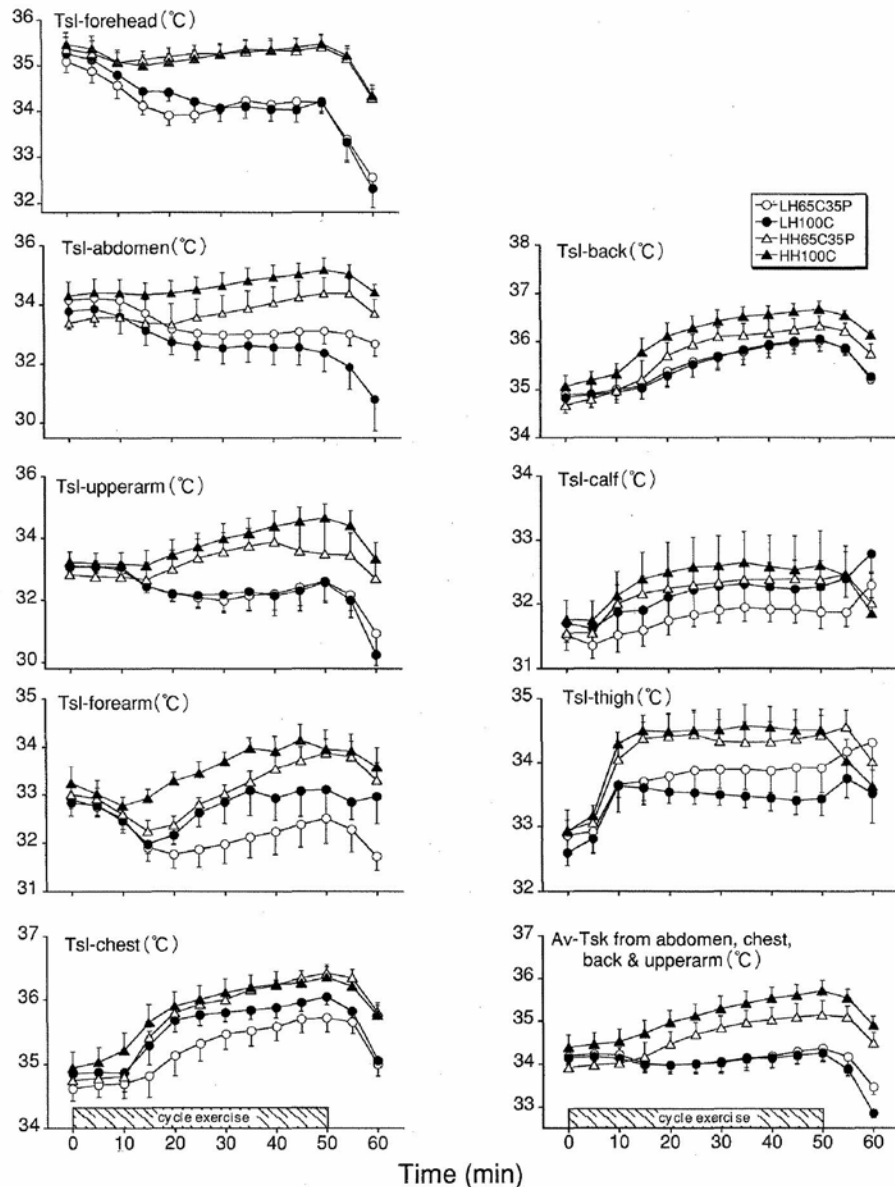


図2 実験中の各部位の局所皮膚温 (Tsl, 前額部, 腹部, 上腕部, 前腕部, 胸部, 背部, 下腿部, 大腿部) および衣服内皮膚温の平均値 (IC-Tsk) の経時変化. 各パラメータの経時変化に関する有意差については結果を参照.

範囲を超えると急激に低下する傾向にあった. これに反して, 衣服内湿度はSRやSkBFの増加とともに上昇し, ある範囲以上 (SRは約 $0.8\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$, SkBFは約250%) ではこれらの量にあまり影響されなかった. また, この範囲以下では同一SRやSkBFで比較するとHHの方が衣服内湿度も高い傾向にあった (図5).

衣服内湿度が70%に達した時のSR, SkBF, 背部Tsl, 衣服内温度および時間を図6に示した. SR, SkBFおよび時間はHHがLHより低く, SRおよびSkBFにおいてはLH100CとHH100Cとの間に, 時間では同じ衣服間で有意な差が認められ

た ($p < 0.05$). 衣服の種類による差はLHではいずれのパラメータにおいても明らかではないが, HHではSR, SkBFおよび時間はHH100Cの条件がLH65C35P条件より低い傾向にあった ($p < 0.1$).

4. 考察

安静時

安静時における多くの生体パラメータは, 湿度の違いにより顕著な影響を受けなかったが, 衣服内湿度はその影響を受け, 湿度が高いほど値が大きくなった. また, これらの変化には衣服の種類の違いは認められなかった. さらに, LHの場合

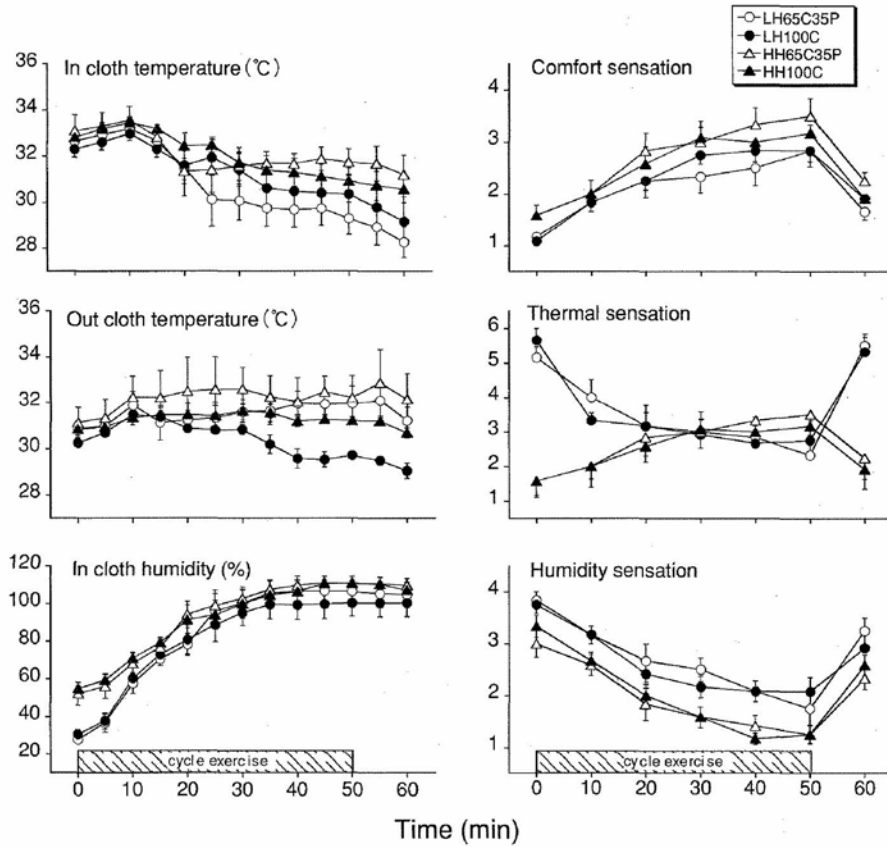


図3 実験中の衣服内温度 (In cloth temperature), 衣服表面温度 (Out cloth temperature), 衣服内湿度 (In cloth humidity) 不快感 (Ucnomfort sensation), 温冷感 (Thermal sensation) および湿感 (Humidity sensation) の経時変化.

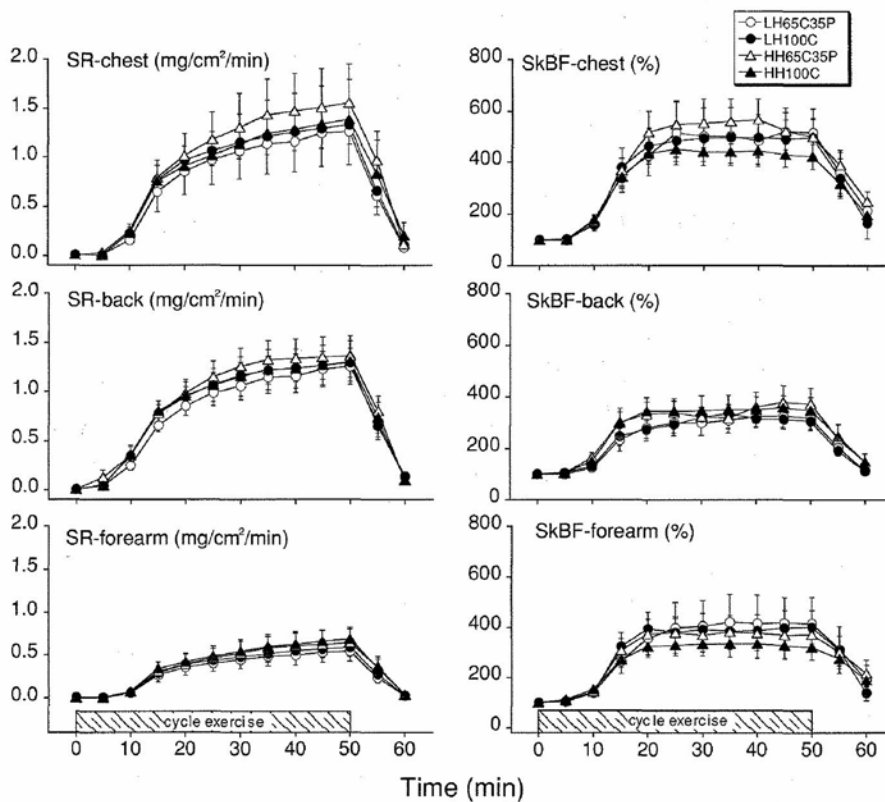


図4 実験中の胸部, 背部および前腕部の発汗量 (SR) と皮膚血流量 (SkBF) の経時変化. 各パラメータの経時変化に関する条件間での有意差については結果を参照.

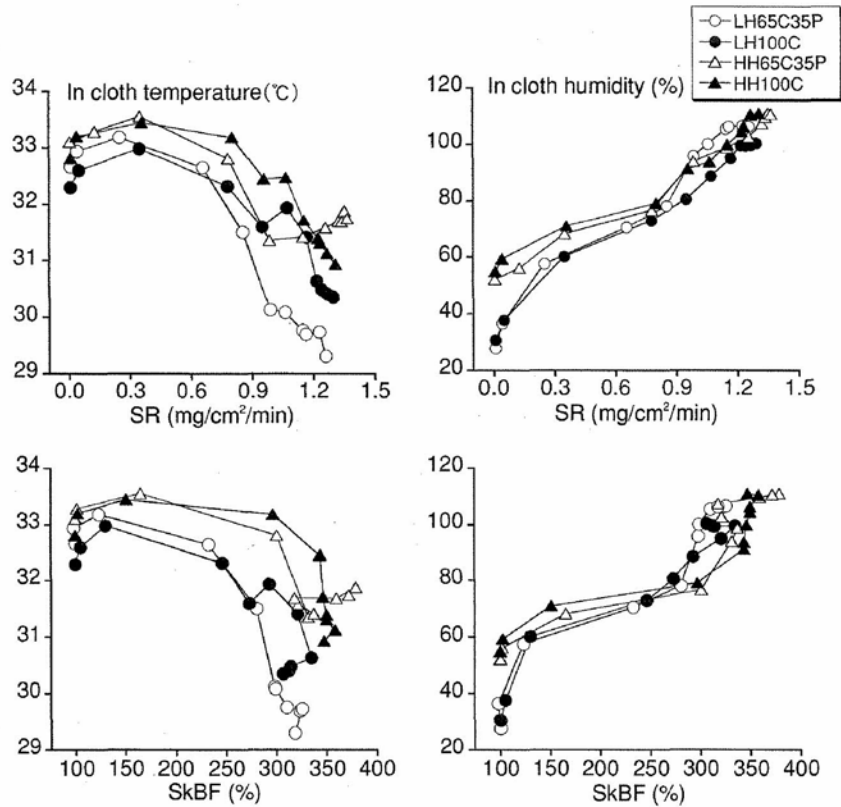


図5 運動中における背部の発汗量 (SR) と衣服内温度 (In cloth temperature) および衣服内湿度 (In cloth humidity) の関係, 背部の皮膚血流量 (SkBF) と In cloth temperature および In cloth humidity の関係.

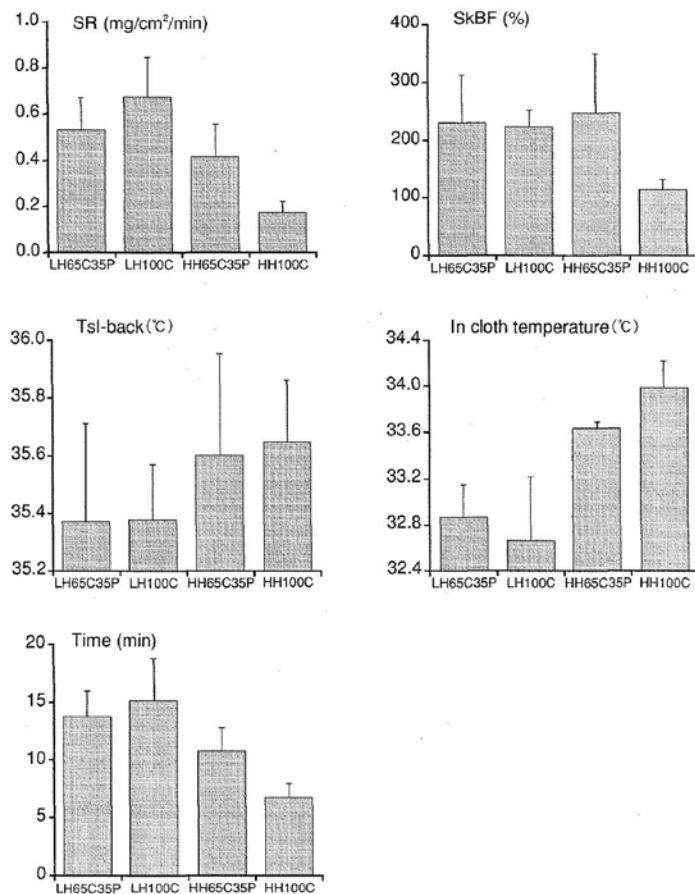


図6 衣服内湿度が70%に達したときの背部の発汗量 (SR), 皮膚血流量 (SkBF), 背部皮膚温 (Tsl-back), 衣服内温度 (In cloth temperature) および時間 (Time). 各パラメータの経時変化に関する条件間での有意差については結果を参照.

には衣服内湿度は外部湿度とほぼ同じ値を示したが、HHの場合には衣服内湿度は約20%低い、約50%であった。このことから、安静時において、皮膚表面の温度や衣服内湿度は湿度の影響を受け、相対湿度が高い場合には衣服の繊維の吸湿性により¹⁰⁾、衣服内湿度が外部の湿度より低く保たれることが考えられる。

安静時のTskには相対湿度の違いが顕著に認められなかった。皮膚からの水分蒸発は湿度が低いほど多いと考えられるが、外部湿度が異なってもこれが衣服の吸湿性等の特性により大きく影響されなかったことが推察される。

安静時の生体反応や衣服内環境に及ぼした湿度の影響が運動時にはどのようなようになるのかを、湿度変化と衣服の繊維素材の影響に分けて次に検討する。

運動時（湿度変化の影響）

運動中における循環パラメータには湿度条件間に有意な差が認められなかったが、HRはLHほど低く、MAPは逆に高い値で運動中は推移していた。HH条件では皮膚温が高く（図1と図2）、このことは皮膚への血液貯留を多くし、これが静脈還流量の低下を引き起こし¹⁸⁾、これによってHH条件ではLH条件と比較してHRがいくらか高くなった可能性がある。また、HRの湿度間の違いには総体重減少量（HH > LH）の差に伴う脱水量の違いも関係しているのかもしれない。LHでMAPが高いのは皮膚血管に関係する総末梢抵抗の低下が小さかったことを反映していることも考えられる。

運動中の深部体温は湿度間に顕著な差は認められなかったが、皮膚温はHHほど高い値を示した（図1と図2）。今回の環境条件においては乾性熱放散と湿性熱放散の両者が熱放散経路として関係しているが、HHでは後者の経路からの熱放散が抑制されていることが考えられる¹⁴⁾。HH条件ではこれを補うために皮膚温がLH条件より高くな

っていたことが推察される。また、汗の蒸発による熱放散量は皮膚温が高いほど多く^{13, 14)}、このことはHHでの湿性熱放散量の低下を、高いTskで補っていたとも考えられる。今回、湿度変化が運動時の深部体温に顕著な影響を及ぼさなかった。裸体で運動した場合ではTaが36℃になると湿度の上昇とともに運動時の直腸温上昇も大きくなる¹⁶⁾。このことから、今回の環境温度がもう少し高い場合は衣服着用時でも運動時の深部体温に湿度の影響が認められた可能性が考えられる。

SR、総体重減少量およびSkBFは湿度間に有意な差が認められなかったが、HHで高い値を示した。これらのパラメータは皮膚温が高いほど多いことから^{9, 13)}、HHでの高い皮膚温が両条件の差を生じたことが考えられる。これに関連して、衣服内湿度は運動前半においてはLHの方がHHのそれより低い傾向にあるが、運動後半は湿度間に顕著な差は認められなかった（図3）。衣服内湿度はセンサーへの水分付着の影響も考えられるので、本研究ではこの値がある値（70%）に達するときのパラメータを比較した（図6）。SR、SkBFおよび時間はHHほど低く、逆に背部Tslおよび衣服内温度は高い。これらのことから、HHではLHより少ないSRで衣服内湿度が70%に達し、また、達するまでの時間も短い。さらに、同一SRおよびSkBFで比較すると、これらの値が低い場合にはHHでの衣服内湿度や温度が高い（図5）。衣服の水分移動は外気の湿度変化に影響されることから^{4, 10)}、衣服着用時における運動中の体温調節パラメータや衣服内環境も湿度に大きく影響を受け、HH条件において生体の負担が大きくなると考えられる。

運動時（繊維素材の影響）

今回用いた衣服を構成している布の特性から（表1）、65C35Pは100Cに比べて熱損失が大きく、水分移動速度が速いとともに、通気性が小さい。

また、乾燥条件と湿潤条件間で保温性を比較すると、繊維素材間での差は湿潤条件の方が大きい。水分にかかわる特性の試料間の差は、高湿度環境で、より顕著に作用すると考えられ、これらの特性の違いからLHでは繊維素材の違いは顕著に見られず、HHではその差が明らかになることが予想される。

今回の結果において、二試料の違いは皮膚温に大きく見られ、特に、衣服を着用している部位の皮膚温はHHで100Cの方が65C35Pより有意に高かった(図1と図2のIC-Tsl)。表1より通気抵抗が高い100Cでは、風通しをさえぎり、水分移動速度が遅く、吸水率が大きいことから、布を通過する水分量は少ないことが考えられる。HH条件では衣服内水分の多くが衣服外に移動し、衣服内環境をある一定の範囲に保つ必要があると考えられるが、100Cの衣服はこのような場合には不利に働き、65C35Pの衣服の方が優れていることが考えられる。これに関連して、衣服内湿度が70%に到達するまでのSR、SkBFおよび時間を見ると(図6)、LHでは二試料の顕著な違いは認められなかったが、HHでは100CでのSR、SkBFおよび時間は65C35Pでのそれより低い傾向にあった。このことから、HH条件では同じ運動を実施しても生体反応や衣服内環境は構成する繊維素材によって異なり、綿とポリエステルとの混紡布の方が綿100%布よりこれらの値を小さくできる可能性が考えられる。

運動中において衣服に吸着した汗の量(衣服重量)はいずれの湿度条件においても100Cが65C35Pより有意に多かった。布の水分移動速度や吸水率の差が吸汗量の差に直接関わっていると考えられる。

布の特性は、構成繊維の性質のみに寄与するわけではなく編組織、編密度などの布の構造や、糸の構造、繊維形状、繊維の太さにも影響されるため、本実験の高湿条件における結果の差が、繊維

素材の違いのみに影響されたと結論づけることは尚早である。しかし、編組織を平編に揃え、編密度の差は小さく、綿65%と綿の割合の大きい混紡布であるにもかかわらず、湿潤条件における熱損失、水分移動速度、通気抵抗、吸水率において、綿100%の布との間に差が見られることから、繊維素材の差が布の特性に密接に関係し、その布の特性が高湿度条件における生体反応に影響を及ぼしていると考察することは妥当であろう。

今回、運動時の衣服はランニング用パンツとTシャツとした。衣服の影響は衣服が覆っている面積にも左右されることが報告されていることから^{3,6)}、皮膚を覆う面積が多くなる長袖や長ズボンのような衣服の場合には、運動時の体温調節反応に及ぼす湿度の影響やそれに伴う繊維や布特性の違いの影響はさらに大きくなることが容易に想像される。このようなことから、運動時の生体反応と衣服との関連を外部環境として湿度も考慮し、また布の混合比率も含めて更に検討が必要であると考えられる

5. まとめ

環境の湿度の違いが衣服着用時の運動時における体温調節反応に及ぼす影響を明らかにするために、健康な男子6名に心拍数が約130拍/分になる強度の自転車運動を50分間実施した。環境条件はLH条件(環境温26℃、相対湿度30%)とHH条件(環境温26℃、相対湿度70%)とし、衣服は100C(綿布)と65C35P(混紡布)の半袖2種類とした。得られた結果は以下の通りであった。

1) 安静時のHR, MAP, Tor, Tesおよび衣服内環境には条件間に有意な差が認められなかったが、HHほど有意に高い値を示した。また、これらの値には繊維素材による差は認められなかった。

2) 運動中の深部体温は湿度間に顕著な差は認められなかったが、TskおよびIC-TslはHHほど有意に高い値を示した。また、SR、総体重減少

量およびSkBFはHHほど高い傾向にあった。

3) 衣服内湿度が70%に達したときのSRおよびSkBFはLH100CとHH100Cとの間に、時間では同じ繊維素材の衣服間で有意な差が認められた。

4) LHでは運動中にTskとIC-Tslに衣服の繊維素材間の顕著な差は認められなかったが、HHでは100Cの方が65C35Pより有意に高い値を示した。また、衣服内湿度が70%に達したときのSR, SkBFおよび時間は、LHでは衣服の種類による顕著な違いは認められなかったが、HHでは100Cで65C35Pより低い傾向にあった。

以上のことから、湿度の違いは衣服着用時の体温調節反応に影響を及ぼし、特に、その影響はHH条件で顕著な皮膚温の上昇をもたらした。また、繊維素材の違いにより湿度の影響程度は異なり、LHでは繊維素材の違いはそれには影響しないが、HHでは綿65%ポリエステル35%混紡布が綿100%布のそれより体温調節パラメータや衣服内環境の変化を小さくすることが示された。

謝 辞

本研究に対して助成いただいた石本記念デサントスポーツ科学振興財団に感謝いたします。また、実験の実施からデータ整理まで全てにおいて尽力をいただいたAKM Shamsuddin氏（日本学術振興会外国人特別研究員）、衣服縫製を快くお引き受けいただきました日清紡績株式会社の志治富子氏にお礼申し上げます。最後に、本研究の被験者を快く引き受けて下さった関係諸氏にお礼申し上げます。

略号対照表

HR	: 心拍数
HH65C35P	: 高湿度環境下での綿65%, ポリエステル35%の混紡布
HH100C	: 高湿度環境下での綿100%の布
IC-Tsl	: 衣服内平均局所皮膚温
LH	: 低湿度
LL	: 高湿度
LH65C35P	: 低湿度環境下での綿65%, ポリエステル35%の混紡布
LH100C	: 低湿度環境下での綿100%の布
MAP	: 平均血圧
SR	: 発汗量
SkBF	: 皮膚血流量
RPE	: 自覚的運動強度
Tes	: 食堂温
Tor	: 舌下温
Tsk	: 平均皮膚温
Tsl	: 局所皮膚温
65C35P	: 綿65%, ポリエステル35%の混紡布
100C	: 綿100%の布

文 献

- 1) 荒木 勉, 神吉賢一, 稲垣和子; 運動への適応に及ぼす着衣の影響—衣服気候からの検討—, 日本衣服学会誌, 28, 29-35 (1985)
- 2) Ha, M., Yamashita, Y., Tokura, H.; Effects of moisture absorption by clothing on thermal responses during intermittent exercise at 24 °C, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 71, 266-271 (1995)
- 3) 平田耕造, 増田茅子, 湯谷 操; 身体活動時の快適性とスポーツウエア, デサントスポーツ科学, 12, 12-32 (1991)
- 4) 井上真理, 佐野優子, 宇山美帆, 丹羽雅子; 柔軟処理による布の風合いならびに熱-水分移動特性の変化と着用快適感, 繊維学会誌, 53, 226-238 (1997)
- 5) Jeong, W. S., Tokura, H.; Effects of wearing two different types of clothing on body temperatures during and after exercise, *Int. J. Biometeorol.*, 33, 77-81 (1989)
- 6) Jeong, W. S., Tokura, H.; Different thermal conditions of the extremities affect thermoregulation in closed man, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 67, 481-485 (1993)
- 7) 川端季雄; 布の熱・水分移動特性測定装置の試作

- とその応用, 織機誌, 37, T130-T141 (1984)
- 8) 川端季雄; 通気性測定装置の開発とその応用, 織機誌, 40, T59-T67 (1987)
 - 9) Kondo, N.; The control of sweating rate and skin blood flow during exercise, In: Nose H et al. Eds., Exercise, Nutrition and Environmental Stress I, Cooper Publishing Group, Traverse City, MI pp.153-178 (1999)
 - 10) 松平光男, 上田博之, 尾畑納子, 喜成年泰, 桑原宣彰, 新宅救徳, 高山輝彦, 山本 考; 21世紀のテキスタイル科学—人と環境との関わり, 日本繊維機学会, (2003)
 - 11) 三ツ井紀子, 酒井豊子, 中島利誠; 運動中の衣服下気候と着心地に及ぼす繊維の影響, 日生氣誌, 23, 35-42 (1986)
 - 12) 三ツ井紀子, 中島利誠; 衣服素材の衣服下気候と着心地に及ぼす影響, 日生氣誌, 28, 125-135 (1991)
 - 13) Nadel, E. R., Bullard, R. W., Stolwijk, J. A.; Importance of skin temperature in the regulation of sweating, *J. Appl. Physiol.*, 31, 80-87 (1971)
 - 14) 中山昭雄; 温熱生理学, 理工学社 (1981)
 - 15) Nielsen, R., Endrusick, T.; Sensations of temperature and humidity during intermittent exercise and the influence of underwear knit structure. *Ergonomics*, 33, 221-223 (1999)
 - 16) 丹羽健市; 運動時の熱平衡に及ぼす湿度の影響, 大阪大医誌, 30, 1-13 (1978)
 - 17) Ramanathan, N. L.; A new weighting system for mean surface temperature of the human body, *J. Appl. Physiol.*, 19, 531-533 (1964)
 - 18) Rowell, L. B.; Human Cardiovascular Control, Oxford University Press (1993)
 - 19) 清水裕子, 日野精二, 新開省二, 富田直明, 広瀬昌博, 鳥居順子, 渡部誠一郎, 渡部修一郎, 渡辺孟, 清水義雄; 運動負荷による衣服間各層の温湿度の変化—3種類のアウトウェア着用時—, 日衛誌, 43, 1130-1139 (1989)
 - 20) 登倉尋実; 環境温度変化時の二層構造編地の温熱生理学的研究, デサントスポーツ科学, 10, 203-208 (1989)
 - 21) 米田守宏, 川端季雄; 過渡的熱伝導の解析とその応用 (第2報), 織機誌, 34, T199-T208 (1981)